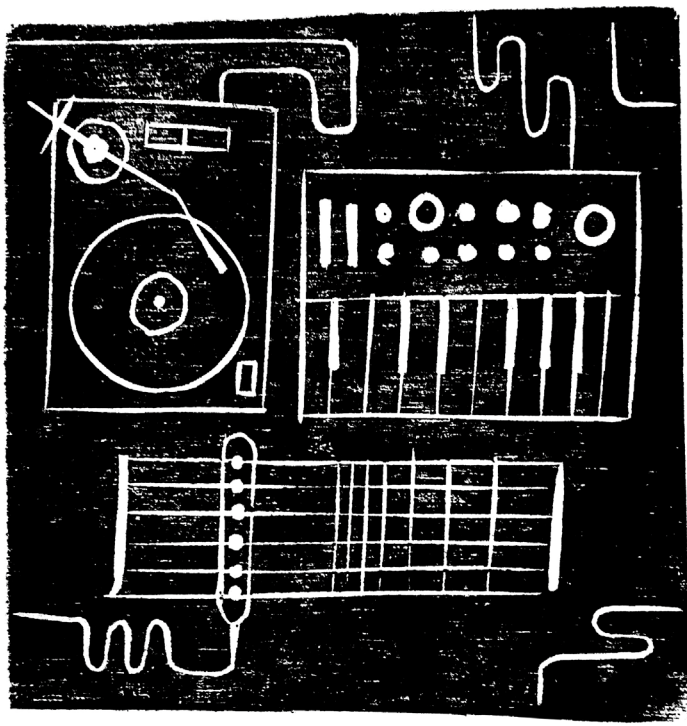


Синтез Звука



Максим Тельманов 2020

Предисловие

Долгое время, голос инструмента, его тембр, определялся исключительно его конструкцией, какого размера резонирующие деки, из какого они материала, из чего сделаны струны, чем на них играют и так далее — всё это определяло звучание инструмента. Весь контроль над тембром, который оставался в руках исполнителя, ограничивался техникой игры: гитарист может приглушить струны у мостика ребром ладони, а скрипач — начать играть «пиццикато», то есть пальцем вместо смычка. В двадцатом веке стремительно изменился подход к тому, как мы создаём музыку. С появлением электромеханических и электронных музыкальных инструментов и эффектов пришла возможность гибкого контроля тембра и, как следствие, постоянно растущее разнообразие звуков при уменьшающемся количестве необходимых инструментов. Музыка прошла путь от огромных оркестров, через эстрадные коллективы, до одиночек, изобретающих целые жанры в уюте своей спальни. Сегодня, благодаря растущей доступности этих инструментов, в арсенале домашнего энтузиаста оказывается немыслимое количество выразительных средств. При первом контакте не до конца ясно, с чего начать, чем пользоваться, как, когда и зачем.

Я написал это руководство, с целью структурировать и упростить базовый объём информации, необходимой для того, чтобы вы открыли для себя изумительный мир синтезаторов и счастье вашего с ними общения. Это настолько же попытка помочь начинающим, насколько и систематизация для самого себя этих хаотично накопленных в свободное время знаний. Мы будем рассматривать самые распространённые модели синтеза и немного не таких распространённых. Мы будем рассматривать, как они работают, как добиваться от них сравнительно предсказуемого результата и как добиваться непредсказуемого. Конкретно в этом руководстве я описываю строго синтезаторы, поэтому я могу время от времени невзначай использовать термины из других областей музыкального знания, например октавы. Делаю я так не потому что считаю это чем-то самим собой разумеющимся, а потому что считаю, что углубляться в них вам будет проще, либо самостоятельно, либо в другом моём руководстве, если на момент прочтения я разродился ещё и руководством по базовому сольфеджио.

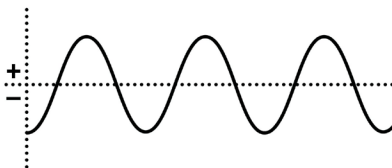
Возможно, вы видели тех горящих своими творческими амбициями людей, которые окружили себя россыпью проводов, регуляторов и кнопок всех форм и размеров. Я применю все доступные мне опыт и усилия, чтобы некогда чуждые очертания этих домашних радиотехнических лабораторий разожгли ваше воображение, так же, как они разжигают моё.

Синтез звука

Звук

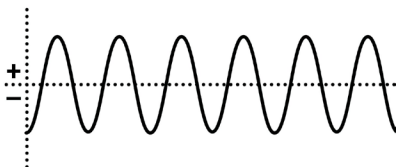
Вся информация об окружающей среде поступает к нам через органы чувств, таких, как зрение, слух, обоняние, вкус и осязание. С помощью слуха мы «слышим» волны, состоящие из областей повышенного и пониженного давления в среде, чаще всего в воздухе. Мы называем эти волны звуком. Звуки издаются, отражаются и поглощаются разными объектами и благодаря этому мы знаем, что объекты существуют и можем даже приблизительно определить близко они или далеко, слева или справа.

Так же, как устную речь мы переводим в письмо, звуки мы можем схематично изображать. Исторически мы записывали музыку с помощью нотной грамоты, но она подходит исключительно для записи музыкальных последовательностей, а не того, как должны звучать отдельные звуки. Она полезна, но не в данном контексте. Наиболее точным образом звуковую волну можно изобразить, как чередующиеся волны плотных и разреженных частиц. Но для наглядности мы будем изображать их в виде графика с давлением по вертикали и временем по горизонтали.

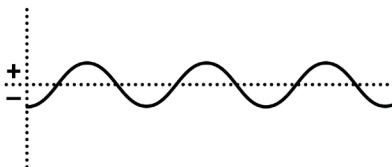


Волны в среде и график

У волны есть две характеристики: частота и амплитуда. Частота также называется высотой звука, например щебет птиц состоит из звуков высоких частот, а рык крупных хищников — из низких. Амплитуда — это, проще говоря, громкость звука. На нашем графике видно, как при изменении частоты волна растягивается и сжимается по горизонтали, при изменении амплитуды — по вертикали. Это называют формой волны и это один из двух способов, как мы будем визуализировать звук.

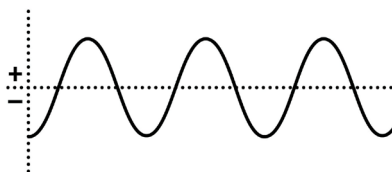


Высокая амплитуда и
высокая частота

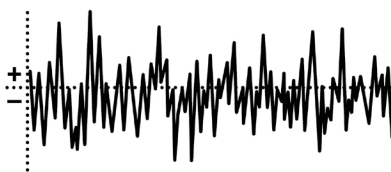


Низкая амплитуда и низкая
частота

Для простоты понимания мы поделим звуки на тоны и шумы. Тоны отличаются от шумов тем, что они регулярно повторяются на слышимой частоте, (для человека это приблизительно от 20 до 20 000 Герц, то есть ударов в секунду). Шумы хаотичны, в них нельзя определить повторяющийся фрагмент, звук прибой или шелест листьев — это шумы.



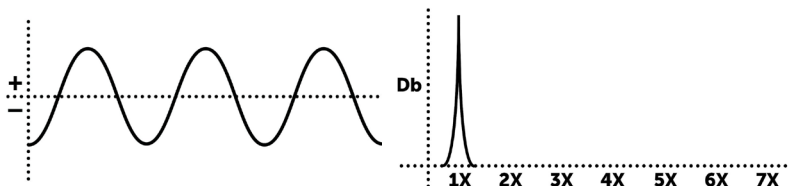
Синусоида



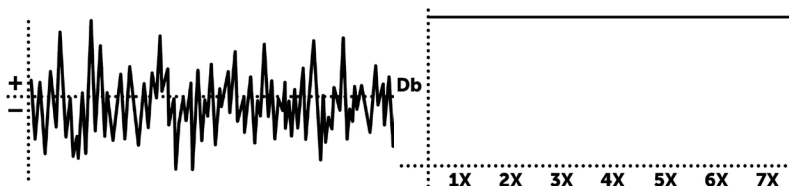
Шум

Дальше становится несколько сложнее. Если мы представим звуки, не как график, непосредственно, колебаний давления, а как график частот этих колебаний по горизонтали и их громкости по вертикали, мы получим спектрограмму. Таким образом, мы видим, что спектр синусоиды — это одна узкая полоска, а спектр белого шума — это весь слышимый диапазон. Если мы изменяем частоту, график сдвигается по горизонтали, а если изменяем амплитуду — по вертикали. Это второй способ, как мы изображаем звук. В отличии от первого способа, мы наглядно видим высоту звука, но только в один момент времени.

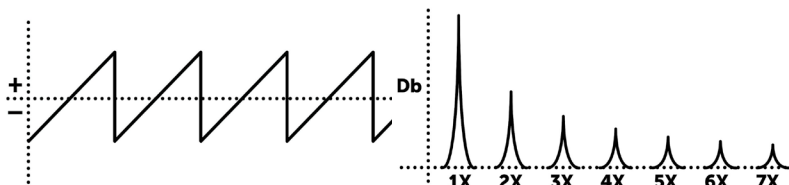
Оба способа ценны по-своему, обоими мы будем пользоваться регулярно¹.



Синусоида



Белый шум



Пилообразная волна

¹ Для Android есть инструменты, такие как [Spectroid](#) и [Oscilloscope](#), для Windows есть [Visual Analyzer](#).

До этого момента мы визуализировали тоны, как синусы, но форм волны — бесконечное множество и их главное отличие от синуса заключается в том, что по сути это теперь несколько синусов сложенных в один звук^{2,3}. Оттого и их спектр теперь выглядит, не как одна выпирающая частота, а как несколько частот разной громкости. Среди них чаще всего мы можем выделить фундаментальную, нижнюю из всех, и обертоны, «вспомогательные» волны формирующие тембр звука. Когда частоты обертонов кратны фундаментальной частоте, то есть в два раза выше, в три, четыре и так далее, мы называем их гармониками.

Базовые формы волны, которые мы будем рассматривать обладают характерными наборами гармоник, которые придают им узнаваемое звучание, это важная часть, к которой мы вернёмся очень скоро.

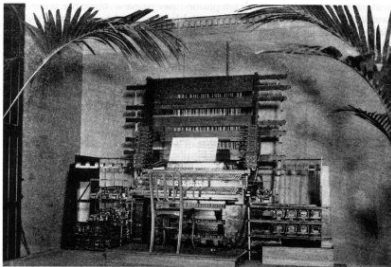
² Попробовать сложить гармоники самостоятельно можно с помощью онлайн инструмента [Harmonic Waveform Generator](#)

³ Наглядно увидеть, как это происходит можно в этом ролике: [Overtones, harmonics and Additive synthesis](#)

История синтеза

Синтез звука из электричества имеет продолжительную историю, которая почти целиком уместилась в XX веке. Если исторический экскурс вас не интересует от слова “совсем”, самое интересное вас ждёт на странице 6. Можете пролистнуть, я не осуждаю.

- 00-е: Тэддиус Кэхилл создаёт Телармониум, электромеханический инструмент из огромных тоновых валов, генерирующих переменный ток, который передаётся по телефонной линии или воспроизводится на дуговых лампах. Старше, чем радио и вакуумная лампа. При весе от 5 до 200 тонн, цене в пять с половиной миллионов долларов в пересчёте на современные деньги, и энергопотреблении в 67 киловатт было построено всего три инструмента. Успех обошёл изобретателя стороной.



Клавиатура телармониума и один из его тоновых валов

- 20-е: Инженер и учёный Лев Термен разрабатывает Этеротон, первый чисто электронный инструмент, управляемый без физического контакта. Расстояние руки исполнителя до правой антенны определяет высоту звука, расстояние до левой антенны — его громкость. Впоследствии коллеги настаивают на том, чтобы переименовать его в Терменвокс, а сам изобретатель учит играть на нём Ленина.



Поздняя реинкарнация Терменвокса производства Moog

- 30-е: Изобретатель и предприниматель Лоуренс Хаммонд разрабатывает электроорган, невероятно компактный по сравнению с духовым органом и Телармониумом, от первого он наследует систему регистров, от последнего заимствует основной принцип работы на тоновых колёсах. Не теряя времени, он продаёт их церквям в больших количествах.



Орган Хаммонда

- 40-е: Дональд Лезли разрабатывает вращающийся динамик, с которым Хаммонд борется всеми правдами и неправдами, что не помешало динамике впоследствии стать неотъемлемой частью узнаваемого, характерного звука его электрооргана. Гарри Чемберлен изобретает инструмент на основе магнитных лент, по одной на каждую клавишу клавиатуры. На каждой ленте были записаны соответствующие ноты сыгранные на одном из инструментов, а также звуковые эффекты и автоаккомпанементы. Путём нехитрой аферы пара таких инструментов впоследствии приплывает в Великобританию и становится первыми Меллотронами.



Меллотрон

- 50-е: Гарольд Родес выпускает первые серийные варианты своего электропианино, компактного и портативного (опять же в сравнении с акустическим пианино) сценического инструмента, в котором молоточки бьют не по струнам, а по камертонам со звукозаписывающими. RCA придумали слово «синтезатор» и первый программируемый перфокартами синтезатор, которым они хотели постепенно сместить живые оркестры, имеющие тенденцию создавать профсоюзы, а это очень не капиталистично. Евгений Мурзин разрабатывает первый многоголосый синтезатор на фотоэлементах, АНС, который впоследствии используется для озвучивания фильмов, таких как «Солярис» Тарковского. На нём нет клавиатуры, но он считывает «партитуры» со специальных стеклянных

пластин покрытых непрозрачной краской с прорезями, расположенными наподобие спектрограммы⁴.



Пианино Родеса



Синтезатор АНС

- 60-е: Роберт Моуг (здесь и в дальнейшем я буду настаивать на том, как Роберт произносил свою фамилию сам) и Дональд Букла разрабатывают свои модульные синтезаторы на восточном и западном побережьях США соответственно, зарождая два очень разных подхода к синтезу, East-coast и West-coast. Про оба мы будем говорить позже, поэтому сейчас это необязательно. Оба избегают слова «синтезатор», потому что не хотят ассоциироваться с RCA.

⁴ В 2013 году принцип его работы и звучание были эмулированы Александром Золотовым в кроссплатформенной программе [Virtual ANS](#) и приложении [PhonoPaper](#).



Модульная система Моуга и модульная система Буклы

- 70-е: Моуг разрабатывает коммерчески успешный компактный упрощённый Minimoog⁵, который больше похож на музыкальный инструмент, чем на шкаф с лапшой, Букла разрабатывает первый синтезатор, управляемый микропроцессором, Дэйв Смит разрабатывает первый полифонический синтезатор с памятью для настроек.



Moog Minimoog



Sequential Prophet-5

⁵ Внешний вид синтезатора вдохновил праздничный гуглодул [78 лет Роберту Моугу](#), к слову, на нём можно играть.

- 80-е: Владимир Кузьмин разрабатывает, возможно, единственный отечественный синтезатор, широко известный за рамками бывшего СССР, Поливокс. Уникальное устройство фильтра дарит ему характерный едкий звук, полюбившийся Rammstein и Мику Гордону. Тем временем на западе от аналоговых синтезаторов все уже порядком утомились. С растущей доступностью цифровых технологий, прогресс в музыкальном оборудовании идёт семимильными шагами, Дэйв Смит предлагает цифровой стандарт обмена информацией между музыкальными устройствами, MIDI, не потерявший актуальности в своем первоизданном виде почти сорок лет. Джон Чоунинг совместно с компанией Yamaha воплощает свою технологию FM-синтеза звука, который мы тоже освоим позднее. Один из самых известных синтезаторов, DX7, применяет эту технологию и одним из первых применяет стандарт MIDI, один из его звуков, имитирующий электропианино стал клише музыки 80-х. Роджер Линн в сотрудничестве с Akai создаёт MPC60, цифровой семплер с 16 чувствительными к силе нажатия клавишами, каждая из которых отвечает за воспроизведение одного звука из памяти. Инструмент оказывает огромное влияние на становление хип-хопа и электронной танцевальной музыки.



Yamaha DX7



Akai MPC60

- 90-е: Дитер Доепфер разрабатывает новый формат модульного синтезатора, eurogack, и ассортимент модулей A-100 system. Появляется множество профессиональных музыкальных программ, таких как трекеры и DAW (digital audio workstation), виртуальные инструменты и эффекты.



Скромная модульная система Eurogack, базовые модули для начинающих

История электронной музыки

Менее продолжительная но не менее увлекательная, история того, как инструменты внедрялись в одни жанры и формировали другие. В то время, как история изобретений полна мужчин, история их популяризации через музыку полна женщин.

- 20-е Талантливая скрипачка Клара Рейзенберг бежавшая из голодной революционной России, вскоре обнаруживает, что болезни голодного детства (то ли связанные с костями, то ли с сухожилиями, источники расходятся) отбирают у неё физическую возможность играть на скрипке. К счастью, она знакомится с Львом Терменом и обучается игре на терменвоксе, попутно даже оказывая влияние на его разработку. Широкую известность она зарабатывает под фамилией мужа, юриста Роберта Рокмора. Джозеф Шиллингер, друг Термена по консерватории, пишет сюиту для терменвокса с оркестром, закрепляя статус инструмента.
- 30-е: Клара Рокмор выступает со всемирно известными оркестрами, не оставляя места для критики возможностей инструмента. Она вдохновляет дирижёра Леопольда

Стоковского написание концерта для терменвокса с оркестром⁶.

- 40-е: Этель Смит виртуозно исполняет популярные произведения латиноамериканской музыки на органе Хаммонда. Инструмент, прежде воспринимаемый только в контексте службы в церкви, становится домашним увлечением многих американцев. Пьер Шеффер начинает экспериментировать с применением в музыке записей шумов и звуков на магнитных лентах, что приведёт к созданию целого жанра Конкретной Музыки.
- 50-е: На экраны выходит знаменитый научно-фантастический фильм, «Запретная Планета», фильм к которому супруги Луи и Биби Баррон написали саундтрек, используя только электронные схемы и электромеханические эффекты обработки. Карлхайнц Штокхаузен учится у Шеффера Конкретной Музыке и сочиняет пьесу «Песнь юношей» в которой использована технология синтеза речи. Различные инженеры и программисты ищут разные способы научить компьютеры сочинять и воспроизводить музыку.

⁶ [Гуглоудд](#) в честь 105-летия Клары Рокмор учит вас играть "Лебедя" Камиля Сен-Санса на тачскрине.

- 60-е: Делия Дербишир записывает электронную интерпретацию заглавной темы телесериала «Доктор Кто», но своё имя в титрах она не увидит никогда. Композитором считался Рон Грейнер, он не смог добиться от BBC признания её соавторства, так как она была сотрудницей студии BBC Radiophonic Workshop. Участник непримечательной рок-группы Overland Stage Electric Band Симеон Кокс Третий купил у друга осциллятор времён Второй Мировой и показал его другим участниками группы. Никого, кроме барабанщика Дэнни Тэйлора, этот прибор не заинтересовал. Симеон и Денни ушли из группы и организовали Silver Apples, где с помощью своего самодельного синтезатора «Симеона» и ударной установки он играют вместе с Джими Хендриксом и выступают на митингах против войны во Вьетнаме. Уэнди Карлос выпускает альбом «Switched-On Bach», собрание сочинений Иоганна Себастьяна Баха исполненное на модульном синтезаторе Моуга, на живых выступлениях ей приходится прилеплять фальшивые бакенбарды и рисовать себе усы, большинство до сих пор знают её, как Уолтера. Гершон Кингсли выпускает альбом «Music to Moog By», в котором мы впервые услышим международный хит «Попкорн». Рэй Манзарек выступает в группе «Doors» в качестве клавишника и басиста благодаря транзисторному

электрооргану Vox Continental и басовому электропианино Fender Rhodes Piano Bass.

- 70-е: В Германии развивается жанр космической музыки, «Kosmische Musik», который британские медиа с подачи радиодиджея Джона Пила называли «Краут-роком». Слово образовалось от послевоенного английского жаргонизма «kraut», который легче всего перевести, как «немчура», «фриц». Сами немцы использовали это слово, применяя его к современной музыке с негативным подтекстом, но когда выяснилось, что британцам музыка нравится, слово прижилось. Вдохновляясь американской музыкой в частности блюзом, сайкоделик-роком, авангардом, они активно используют электронные инструменты и принципы Конкретной Музыки. Яркими представителями жанра можно назвать Kraftwerk и Tangerine Dream. В США в похожем жанре спейс-рок выступают Hawkwind. Херби Хенкок формирует свой стиль, смешивая джаз с фанком и электронной музыкой. В Великобритании развиваются жанры «New Wave» и «Пост-панк», вдохновлённые краут-роком и также активно внедряющие в аранжировку синтезаторы. Разномастная синтезаторная музыка из Италии появляется на полках музыкальных магазинов США как «Итало-диско». Диджей Kool Herc играет на двух виниловых проигрывателях поочерёдно один и тот же

фрагмент ударного соло, тем самым превращая его в «брейк». Он же наряду с другими диджеями интуитивно приходит к «скретчу», ручному прокручиванию пластинки под иглой тонарма проигрывателя, что даёт характерный звук. С натяжкой можно сказать, что базовые принципы подобных взаимодействий с записанным материалом были заложены опять же ещё в Конкретной Музыке.

- 80-е: Развивающиеся жанры хип-хопа и электрофанка активно используют Roland TR-808 как основу ритмической составляющей. TR-909 вдохновляет первых хаус и техно продюсеров, а басовый синтезатор TB-303 буквально становится ключевым элементом поджанра «эйсид». Полифонические синтезаторы, такие как Sequential Prophet-5 и цифровые драм машины, вроде Oberheim DMX и LinnDrum формируют характерное звучание синтипопа. Синтезатор Yamaha DX7 в мейнстримной музыке используют все, легче сказать, кто его не использовал.
- 90-е: С помощью семплеров Akai MPC брейки и звуковые эффекты нарезаются на семплы, что упрощает их воспроизведение вживую и при записи, но что самое главное, дают возможность для брейкбита, импровизированному перемешиванию фрагментов брейка. Этот приём активно используется в плеяде жанров, включая

хип-хоп, джангл, драм-н-бэйс, биг бит и так далее. Один из самых используемых брейков, если не самый — это «Amen break» из сингла «Amen, Brother» группы the Winstons. DJ Shadow записывает альбом Endtroducing используя только Akai MPC60. В контексте культуры компьютерной «демосцены» формируется «трекерная» музыка, то есть написанная на специальной музыкальной программе, «трекере», эксплуатирующей звуковые чипы ранних домашних компьютеров. С приходом полноценных DAW границы электронных и не электронных жанров размываются.

Субтрактивный синтез

Сложно сказать, кто первым использовал фильтры и осцилляторы для создания звука, не вдаваясь в полноценное исследование, поэтому скажем, что популяризировал субтрактивный синтез Роберт Моуг. Мы называем этот тип синтеза субтрактивным, потому что для создания широкой палитры тембров мы всегда «вычитаем» фильтром часть спектра гармонически насыщенной формы волны. Принцип остался неизменным по сей день, из-за его качеств:

- интуитивность в освоении — в большинстве случаев управляя одним из параметров вы слышите, как меняется звук
- гибкость — один принцип работы используется для создания широчайшей палитры звуков, а принципов работы большое множество
- масштабируемость — полифонические синтезаторы работают, как несколько скоординированных монофонических

Простоты ради разделим элементы простейшего одноголосого субтрактивного синтезатора на элементы, управляемые напряжением, и генерирующие управляющее напряжение:

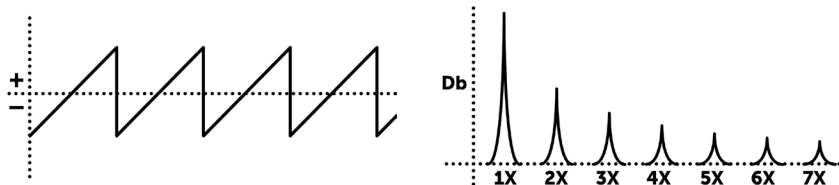
Управляемые	Управляющие
Осциллятор — генерирует колебания напряжения в слышимом диапазоне, которые впоследствии раскачивают динамик и становятся слышимым звуком	Низкочастотный осциллятор — генерирует колебания ниже слышимого диапазона Генератор огибающей — генерирует плавно нарастающее и/или затухающее напряжение
Фильтр — изменяет гармонический состав колебаний осциллятора, тем самым меняя тембр слышимого звука	Клавиатура — генерирует напряжение, возрастающее от нижних клавиш до верхних, и пульс, реагирующий на нажатие и отпускание клавиши, по объяснимым причинам внешне напоминает клавиатуру фортепиано
Усилитель — изменяет амплитуду колебаний осциллятора, тем самым регулируя громкость слышимого звука	

Впоследствии мы выясним, что элементов больше, функционал большинства вышеописанных элементов может быть шире заявленного, они могут быть взаимозаменяемы и так далее. Но для начала этого должно быть достаточно. Рассмотрим каждый элемент подробнее:

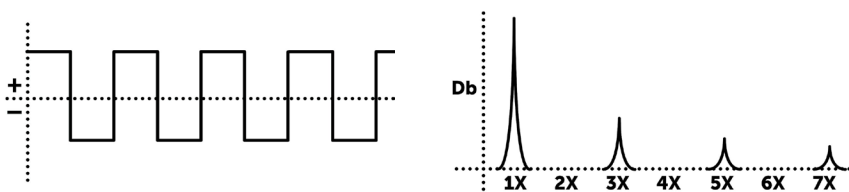
Осциллятор

Примеров похожих устройств в природе полно: по частоте звука, который издаёт комар или медведка мы можем определить частоту, с которой их крылышки бьют по воздуху и создают те самые звуковые волны. Ваши голосовые связки бьются друг об друга из-за чередующихся разниц давления в гортани. Тем не менее, отличие синтезаторного осциллятора (VCO, voltage controlled oscillator) в том, что сам он работает беззвучно, мы можем слышать только то, как динамик раскачивается переменным напряжением, которое осциллятор создаёт.

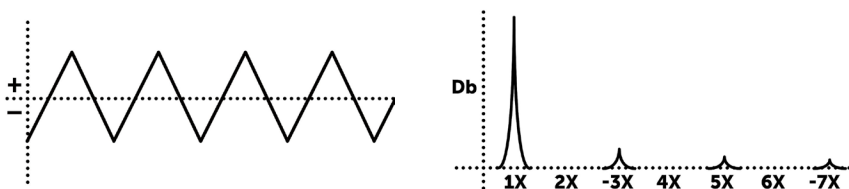
Базовые формы волны, чаще всего доступные в синтезаторах — это треугольная, пилообразная и прямоугольная. Каждая обладает своим набором гармоник, у пилообразной есть все гармоники, они затухают по определённой последовательности. У прямоугольной формы волны гармоники затухают по тому же принципу, но присутствуют только нечётные гармоники. У треугольной — гармоники тоже только нечётные, но затухают они быстрее и каждая вторая нечётная гармоника находится в противофазе, то есть вверх тормашками.



Пилообразная волна



Прямоугольная волна

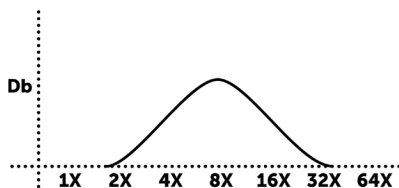
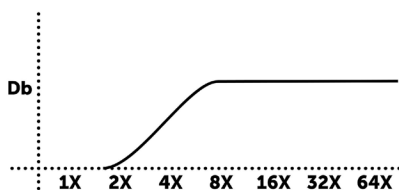
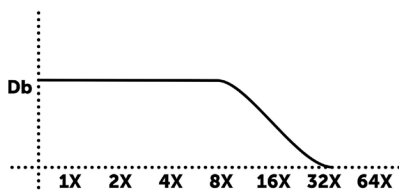


Треугольная волна

В зависимости от синтезатора частота осциллятора может изменяться переключением октав, регуляторами грубой и тонкой настройки, а также напряжением с клавиатуры и других

компонентов. Осцилляторов может быть несколько даже в одноголосом синтезаторе, для создания более плотного звука, более сложного тембра за счёт их взаимодействия, в Korg MS-20 их два, а в Minimoog — целых три.

Фильтр

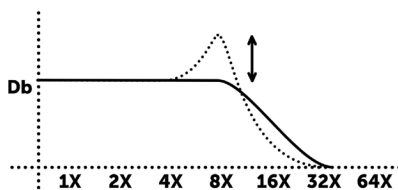
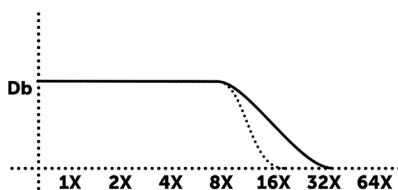
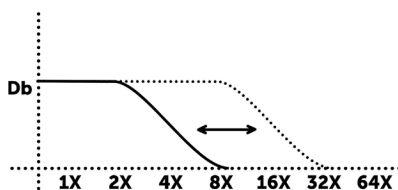


Его легче всего сравнить с подушкой, она пропускает низкие частоты и поглощает высокие, если в неё выговорить всё, что накопело. Фильтр (VCF, voltage controlled filter) также пропускает один диапазон частот и не пропускает другой.

Есть много видов фильтров, но мы обратим внимание на три самых распространённых, проиллюстрированных слева сверху вниз: фильтр высоких частот (часто обозначаемый,

как low-pass) не пропускает частоты выше выбранной, фильтр низких частот (high-pass), соответственно, не пропускает ничего

ниже выбранной частоты, а полосовой фильтр (band-pass) пропускает только выбранный диапазон частот и убирает все частоты выше и ниже по спектру. На иллюстрации мы видим диапазон частот, которые проходят через фильтр, диапазон частот, которые не проходят, и рампа между ними.



Основной параметр фильтра — частота среза (cutoff frequency) частота, после которой все остальные частоты становятся тише и исчезают. Она может регулироваться отдельным регулятором или управляться напряжением.

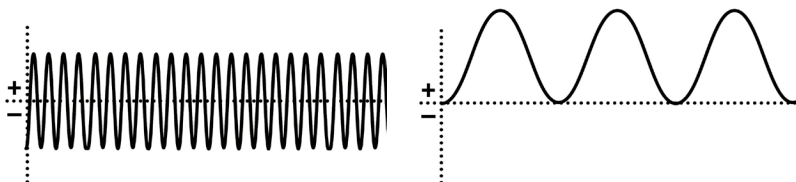
Другой важный параметр — это крутизна ramпы среза, например 12 децибел на октаву или 24 децибел на октаву. Это значит, что с

каждой октавой тон будет соответственно на 12 или 24 децибела тише. Как правило, этот параметр определяется конструктивной особенностью фильтра.

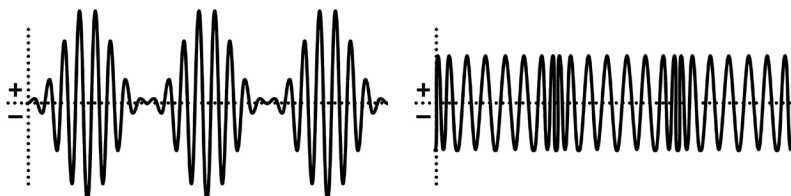
Третий параметр — это резонанс фильтра, он позволяет выделить частоту в начале среза. Он так же, как и частота, управляется отдельным регулятором и, в некоторых случаях, даже напряжением. Все три параметра проиллюстрированы сверху вниз на предыдущей странице.

Низкочастотный осциллятор

Продолжая аналогию с крыльями, мы укрупняем до размеров птиц. Мы слышим отдельные хлопки, но не слышим тон. Мы видим ритмичное качание, которое приводит массу в движение, так же, как низкочастотные осцилляторы (LFO, low frequency oscillator) добавляют движения звуку, контролируя один из его параметров. Мы можем контролировать им частоту среза фильтра, громкость или даже частоту слышимого осциллятора, создавая характерные эффекты вау-вау, тремоло или вибрато соответственно.



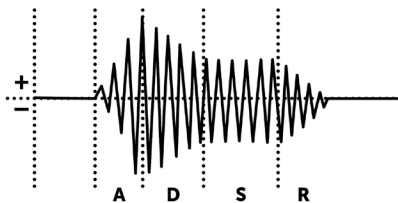
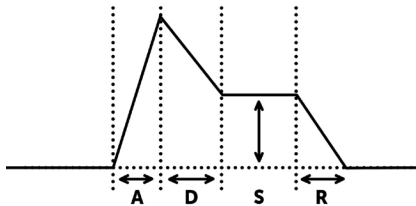
На иллюстрации: волна слышимая (носитель) слева и волна ниже слышимого диапазона (модулятор) справа.



А на этой иллюстрации: результаты модуляции амплитуды носителя слева и модуляции частоты носителя справа.

Так же, как и со слышимыми осцилляторами, есть несколько базовых форм волны, каждая из которых будет создавать характерный эффект. На примере управления частотой осциллятора, треугольная волна будет давать привычное качание (уиуиуиуиу), квадратная волна как бы переключается между двумя крайними положениями (иии-ууу-иии-ууу), как сирена скорой помощи, а пилообразная будет делать затухающие удары, наподобие бластера (пиу-пиу-пиу.)

Генератор огибающей



Звук флейты быстро нарастает, держится на необходимом уровне, пока тянется нота, и быстро затухает. Звук фортепиано начинается резко, постепенно угасает пока клавиша нажата и быстро угасает, когда она отпущена. Чтобы реализовать такого рода развитие звука в синтезаторах, была придумана огибающая (EG, envelope generator).

Это опять же одна из тех частей, которые принято

иллюстрировать для наглядности. На первом графике мы можем видеть пульс, который подаётся с клавиатуры, тут клавиша нажата, а тут она отпущена. На втором графике мы видим, как на пульс с клавиатуры реагирует сама огибающая: после нажатия начинается нарастание сигнала (attack) до максимального значения, после чего он плавно угасает (decay)

до заданного значения и держится (sustain) на этом уровне до того момента когда клавиша будет отпущена. Когда мы отпускаем клавишу, начинается постепенное угасание (release) сигнала до нуля. Огибающая с таким функционалом часто сокращается до ADSR по первым буквам параметров. На третьем графике мы видим, как такая огибающая может влиять на амплитуду сигнала.

В зависимости от сложности синтезатора, огибающих может быть две, у них может быть не два параметра, а три (ADR или ASR), или пять (ADSHR или DADSR, где H - это hold, время с момента отпускания клавиши до начала затухания, а D - это delay, время с момента нажатия до начала нарастания).

Клавиатура

Я решил, что этот компонент заслуживает отдельного рассмотрения, потому что:

- Клавиатура синтезатора зачастую бывает значительно меньше фортепианной (25 или 37 клавиш против 88-ми) из соображений компактности.

- В связи с этим справа от клавиш или в осцилляторном блоке может находиться переключатель октав, виртуозное владение которым позволяет делать молниеносные пассажи.
- Чаще всего клавиатура снабжена колёсиком модуляции, которое позволяет менять звук прямо во время исполнения с большим удобством, чем с помощью регуляторов, и колёсиком бэнда, позволяющим плавно опустить или поднять звук на выбранный интервал, имитируя похожие приёмы на гитаре, скрипке, флейте или губной гармошке.
- Клавиатура может обладать чувствительностью к силе нажатия и контролировать этой силой дополнительный параметр, как на фортепиано меняется громкость и тембр с разной силой нажатия на клавишу.
- Так же есть клавиатуры с так называемым афтертачем (aftertouch), то есть чувствительностью к силе давления на клавишу не в момент удара, а во время её удержания.
- В зависимости от конструкции синтезатора управляющий сигнал с клавиатуры помимо частоты осциллятора может изменять частоту среза фильтра и другие управляемыми напряжением параметры.

- Регулятор глиссандо (portamento или glide) на некоторых моделях позволяет настраивать скорость, с которой меняется управляющее напряжение, например, насколько плавно одна нота будет сменяться другой при нажатии следующей клавиши.

Усилитель

Не самая интересная часть, но достаточно важная. После того как мы отпускаем клавишу осциллятор не останавливает работу, он продолжает звучать соответственно последней нажатой клавише. Точно так же, когда мы нажимаем на клавишу, осциллятор не начинает работу, он работал и до нажатия. Чтобы слышать осциллятор, только когда нам это нужно, мы пользуемся усилителями. Как и положено компоненту с таким названием, усилитель (VCA, voltage controlled amplifier) усиливает сигнал, например амплитуду осциллятора или делает его тише в зависимости от управляющего напряжения поступающего на него с клавиатуры, огибающей или низкочастотного осциллятора.

Микшер

Микшер это неотъемлемая часть любого синтезатора. Как и всё самое лучшее, его работа незаметна, но мы им пользуемся,

когда смешиваем звук двух осцилляторов, чтобы создать более насыщенный тембр, или когда назначаем на фильтр два источника управляющего напряжения, например, огибающую и клавиатуру.

И так далее

Гибкость субтрактивного синтеза в том числе в том что, как уже было сказано ранее, элементы могут взаимозаменяться, а функционал - расширяться.

Помимо трёх стандартных форм волны осцилляторы могут включать себя генератор белого шума, формы волны могут не просто переключаться а плавно перетекать из одной в другую, прямоугольная волна может позволять менять свою скважность или ширину импульса (pulse width), управлять этой скважностью напряжением и т.д.

Осцилляторы и низкочастотные осцилляторы в некоторых случаях могут быть объединены в один элемент с широким спектром частот, таким образом мы можем получить более плотный звук или больше возможностей модуляции в зависимости от того что нам нужно в данный момент, при этом не перегружая интерфейс синтезатора излишествами. Также это позволяет модулировать осцилляторы на частотах слышимого

диапазона что приводит к абсолютно новым результатам, впрочем это опять же тема другой части этого руководства.

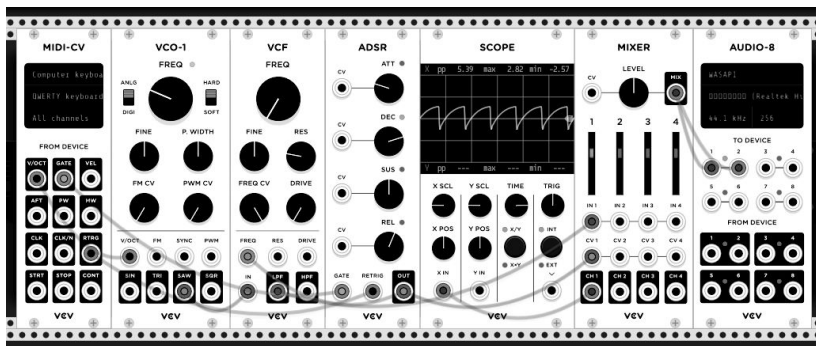
Низкочастотные осцилляторы могут работать в качестве простейшей AR огибающей, если сделать её частоту достаточно низкой (или вовсе заставить её останавливаться после первого цикла), а перезапуск фазы волны привязать к нажатию клавиши. Такой приём используется в Korg Monotron. Огибающая наоборот может служить в качестве сложного низкочастотного осциллятора, если есть возможность её зациклить.

Некоторые фильтры могут быть использованы, как дополнительный осциллятор, если повысить значение резонанса до точки так называемой самоосцилляции, то есть момента когда фильтр самостоятельно генерирует звук на частоте среза, даже без входящего сигнала. Это распространённый способ получения такой экзотичной для аналоговых синтезаторов формы волны, как синусоида.

Практика

Чтобы у всех была возможность попрактиковаться, мы вместе создадим простой синтезатор в виртуальной среде [VCV Rack](#). Есть более простые для освоения виртуальные аналоговые

синтезаторы, но я считаю, что наглядно увидев это на сложном примере, мы с большей лёгкостью транслируем опыт на не модульные синтезаторы, чем наоборот.



Да, это базовый патч при запуске программы, нет, мне не стыдно, он хорошо иллюстрирует принцип действия.

Наш простейший синтезатор состоит из одного осциллятора, который подключен к фильтру. Сигнал из фильтра идёт напрямую к микшеру, а оттуда прямо на выводящее звук устройство. Фильтр и микшер (в качестве усилителя в данном случае) управляются генератором огибающей. Если у вас есть MIDI клавиатура или устройство, которое может выполнять её роль, например синтезатор или электропианино, я рекомендую подключить его к компьютеру и играть со всеми удобствами, остальные могут пользоваться верхним рядом букв на клавиатуре в качестве белых клавиш и цифрами в качестве чёрных.

Несколько советов для самостоятельного освоения:

- Попробуйте воссоздать звуки максимального количества жанров. Как субтрактивный синтезатор используется в краут-роке, фанке, итало-диско, индастриале, эйсид-хаусе?
- Стремитесь к простоте, но не примитивности. В большинстве ситуаций вам хватит одного фильтра, но что если независимо управлять последовательно подключенными фильтрами низких частот и высоких частот? Попробуйте придумать применение трём генераторам огибающей, управляйте частотой одного низкочастотного осциллятора с помощью другого, пуститесь во все тяжкие.
- Послушайте, чем отличаются фильтры разных синтезаторов друг от друга, чем отличается функционал осцилляторов, многие из этих отличий стали характерной чертой, услышите знакомые песни по-новому, внезапно узнав синтезатор, на котором исполнена партия.

FM синтез

Одно только его упоминание может заставить даже опытных энтузиастов ёрзать на месте, потеть и тяжело дышать. Скорее всего, это связано с двумя вещами: во-первых, сам по себе принцип действия крайне не интуитивен, достичь сравнительно предсказуемых результатов бывает сложно, даже имея базовое представление о том, как оно работает, во-вторых, на момент написания статьи в подавляющем большинстве синтезаторов, применяющих этот тип синтеза, свой звук создать можно только закапываясь по пояс в плеяде меню на крошечном экране.

Тем не менее, вслушиваясь в музыку 80-х, можно подумать, что синтезаторов кроме Yamaha DX7 не существует, они либо безнадёжно морально устарели, либо ещё не появились на свет. Причин популярности опять же несколько:

- Новый принцип синтеза способен на широчайший диапазон тембров, от тягучих басов, переходящих в территорию инфразвука и привычных струнных, до ярких органов и очень правдоподобных колоколов.
- Как было сказано ранее, его сложно настраивать самостоятельно, но кому это нужно, когда в него любезно

положили 128 заводских вариантов настройки, а пользоваться вы будете только «электропианино 1», «духовыми 1» и «бас гитарой 1»

- В отличие от аналоговых синтезаторов, у цифрового не поплывёт строй из-за изменений температуры окружающей среды, а 16 голосов полифонии и чувствительность к силе нажатия — это ещё большая свобода исполнительской выразительности.
- Yamaha DX7 стал одним из первых и точно самым коммерчески успешным применением новой технологии обмена музыкальными данными между инструментами, MIDI.
- Упрощённая форма чипа, используемого в производстве этого синтезатора, нашла применение в первых компьютерных звуковых картах, таких как AdLib, аркадных автоматах и домашних игровых приставках, таких как Sega MegaDrive. Некоторые звуки FM синтеза до сих пор у многих ассоциируются с ретро-геймингом.

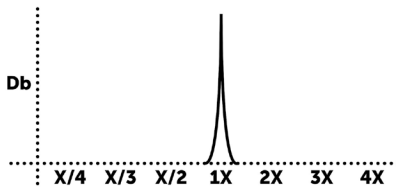
Название FM синтеза во-первых переводится, как частотная модуляция (frequency modulation), во-вторых не до конца технически корректно, потому что технология построена вокруг

фазовой модуляции (phase modulation), у них разный принцип действия, но, в нашем случае, абсолютно идентичный результат. Ключевая особенность FM синтезатора заключается в отсутствии фильтра и наличии от двух и более «операторов», особых осцилляторов, которые в зависимости от алгоритма могут звучать сами или управлять тембром друг друга в разнообразных комбинациях, которые называются алгоритмами. Несмотря на то, насколько новый принцип синтеза отличается от субтрактивного, он переосмыслил такие ключевые его компоненты, как осциллятор и огибающую. С ними и с остальными компонентами ознакомимся ниже.

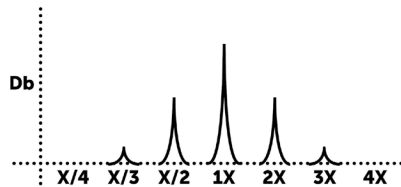
Операторы

Выше, в описании субтрактивного синтеза, были описаны осцилляторы, управляемые напряжением и работающие в слышимом диапазоне, и низкочастотные осцилляторы, генерирующих управляющее напряжение и работающие в диапазоне намного ниже слышимого. Представим универсальный осциллятор, который работает только в слышимом диапазоне, но способный генерировать и принимать управляющий сигнал. Ещё одна его особенность в том, что единственная форма волны, которая нам доступна -- это синусоида. Так выглядит оператор, элементарная частица FM

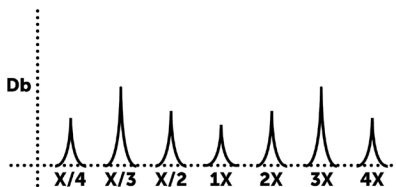
синтеза, количество этих операторов напрямую влияет на то насколько сложные звуки мы можем создавать.



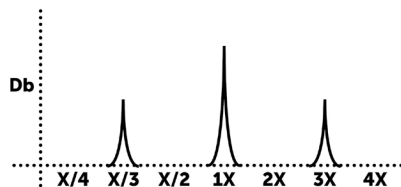
Ratio 1:1 Volume 0%



Ratio 1:1 Volume 20%



Ratio 1:1 Volume 82%



Ratio 1:2 Volume 20%

На иллюстрации выше — примеры спектров сочетаний параметров соотношения частот (ratio) носителя и модулятора и громкости модулятора (volume).

Тем не менее, для самой простой демонстрации принципа действия нам будет достаточно двух. Если один из них будет модулировать другой, они разделяются на роли, носителя и модулятора. Модулятор неслышим, слышимо только его воздействие на слышимый носитель. У обоих операторов есть

два режима действия, привязанный к высоте ноты с клавиатуры и свободный, всегда звучащий на одной частоте. В первом режиме мы можем выбрать, во сколько раз частота оператора выше частоты нажатой на клавиатуре ноты, также есть более точная настройка, но сейчас она всё только усложнит. Во втором режиме мы просто выставяем частоту звучания оператора, вне зависимости от высоты нажатой ноты.

Соотношение частот и громкостей между носителем и модулятором — это то, что определяет гармонический состав звука, то есть его слышимый тембр. Чем выше модулятор относительно носителя, тем дальше друг от друга расположены гармоники. Чем громче модулятор относительно носителя, тем сильнее эти гармоники выражены в звуке.

Алгоритмы

С увеличением количества операторов, количество их возможных комбинаций и взаимодействий увеличивается экспонентно. Например в нашем наборе из двух операторов у нас только два возможных алгоритма. В компактном современном Yamaha Reface DX операторов 4, а алгоритмов 12; в оригинальном же DX7 операторов 6, а алгоритмов 32. В Korg Opsix алгоритмы можно создавать самостоятельно, что раньше

было невозможно, а позже, видимо, мало кому приходило в голову.

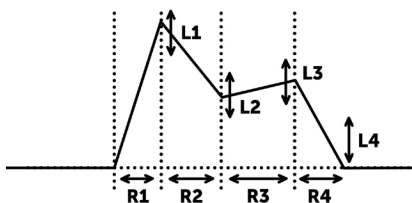
Алгоритмы служат базовым маршрутом для построения звука и все дают определённое количество свободы в том или ином направлении. Башенка из операторов позволяет построить насыщенный звук, сложно изменяющийся со временем, но две башенки пониже позволяют сложить два звука попроще. Ряд из носителей никак не будет взаимодействовать друг с другом, но идеально подойдёт для многосоставного звука электрооргана. Один модулятор может влиять на три разных носителя, или наоборот, один носитель может быть под влиянием трёх модуляторов. Все эти комбинации дадут свой звук, осталось только определиться, какой из них будет соответствовать вашим требованиям.

Обратная связь

На графиках алгоритмов мы можем обратить внимание на своеобразное «колечко», где оператор зациклен сам на себе, как некоторые исполнители при первом признаке малейшего успеха, или где несколько операторов влияют друг на друга. Применения для этого инструмента, как правило два: при умеренных значениях мы можем имитировать формы волны, знакомые нам по субтрактивному синтезу, при максимальных

значениях мы можем получить шумовую составляющую, полезную для создания звуков ударных или духовых.

Генераторы огибающих



Ещё одна особенность FM синтеза заключается в том, что на каждый оператор приходится по одной огибающей, управляющей его громкостью и на весь голос

приходится ещё одна огибающая, управляющая частотой всех операторов. Когда мы настраиваем огибающую носителя мы определяем как будет нарастать и затухать сам звук. Когда мы настраиваем огибающую модулятора, мы определяем как будет меняться гармоническая составляющая, тембр. Это похоже на то как меняется тембр в субтрактивном синтезе если огибающая назначена на фильтр, разница в том что фильтр вычитает гармоники, а модулятор в FM синтезаторе наоборот обогащает звук гармониками. Чем ниже частота среза фильтра, тем глуше становится звук; чем тише модулятор, тем, опять же, глуше звук.

Генераторы огибающей обладают ещё одной особенностью, они имеют восемь настраиваемых параметров. Вместо привычных ADSR мы имеем четыре значения громкости

оператора (три значения пока клавиша нажата и одно после того как она отпущена) и четыре значения скорости, с которой огибающая достигает каждого последующего значения. На иллюстрации на предыдущей странице эти параметры указаны как R (rate), то есть скорость, и L (level), то есть громкость, уровень.

Низкочастотный осциллятор

В отличие от субтрактивного синтеза, позволяющего назначить низкочастотный осциллятор на множество разных элементов, в FM синтезаторе он может управлять только частотой всех операторов, это позволяет создавать эффекты вибрато, неотъемлемые для таких звуков, как солирующая скрипка.

Прочее

Несмотря на то что мы пытаемся максимально упростить эту модель для простоты понимания, было бы неправильно умолчать о множестве дополнительных возможностей:

- На каждый оператор также назначена кривая, которая определяет как высота нажатой ноты меняет громкость

оператора. Это можно использовать в создании сложных звуков, в которых высокие ноты менее насыщены гармониками, чем нижние, как на гитаре

- Каждый оператор может иметь разную чувствительность к силе нажатия клавиатуры, что очень важно для создания звуков, реагирующих на выразительность игры исполнителя, например электропианино или бас.
- Операторы могут иметь разную чувствительность к низкочастотному осциллятору. Сложно сразу сказать, для создания каких звуков это могло бы пригодиться, но это однозначно дополнительное поле для экспериментов.
- Параметр «detune», расстраивает оператор на доли полутона, что может помочь создать более несовершенный, живой звук, в идеальной среде цифрового синтезатора
- Форм у низкочастотного осциллятора такое же множество, как и на субтрактивных синтезаторах
- Большинство старых FM синтезаторов и некоторые новые поддерживают протокол передачи сохранённых настроек через MIDI разъём, с инструмента на инструмент, с

компьютера на инструмент или даже с инструмента на компьютер.

- В Korg Opsix, который вышел во время написания этого руководства, помимо синтеза на основе частотной модуляции ввели похожий принцип, но на основе амплитудной модуляции.

Практика

Чтобы дать возможность попрактиковаться всем, я выбрал бесплатный виртуальный инструмент [Dexed](#). Можно спорить о звуке и о дизайне интерфейса, но он бесспорно очень наглядный и функционально идентичен Yamaha DX7. Мы будем создавать простой звук, который частенько можно услышать в хаус музыке.



Чтобы начать с нуля, нажимаем Init. Наш звук состоит из простой башенки из двух операторов, для этого подойдут подавляющее большинство алгоритмов,

например 1-19. Операторы 3-6 отключаются, на этот раз они нам не нужны. Первый оператор — это носитель и от него нам нужна



оггибающая, а так как мы хотим, чтобы звук был не слишком резким в начале, без так называемого «цифрового щелчка», мы немного сглаживаем оггибающую и придаём во втором ряду значения (rate=80, 99, 99, 80).

Второй оператор — это модулятор и он формирует тембр нашего звука, присваиваем ему частоту в два раза выше носителя (coarse f=2) и формируем оггибающую с характерным резким

затуханием в начале и плавным затуханием в конце (level=99, 66, 0, 0; rate=99, 44, 17, 99). Общая громкость этого оператора определяет насколько яркий звук мы хотим получить, сделаем его более глухим (level=88), но можем присвоить ему чувствительность от силы нажатия, если нам это интересно. На оба оператора можно применить «расстройку» (detune=-7 и detune=7 соответственно) для более органичного звука.

Для освоения этого типа синтеза в любом случае потребуется определённое трудолюбие и искренняя заинтересованность, но

есть пара советов, которые я могу дать. Надеюсь, они направят вас в нужном направлении и хотя бы немного облегчат путь к уверенному созданию своих звуков:

- Вся эта работа проделана до вас не просто так. Возьмите готовый звук, который вам нравится, препарируйте его, поймите, как он работает. Меняйте его, согласно вашим представлениям о том, как он может стать лучше. Это очень эффективный способ начать применять приёмы, которыми пользовались лучшие саунд-дизайнеры того времени.
- Любите звуки глазами, изучайте спектр тех звуков, которые вам хотелось бы имитировать. Изучайте то, как разные соотношения частот, уровни громкости, обратная связь, алгоритмы влияют на спектр вашего звука. Вы никогда не воссоздадите идеальный звук фагота, но то что вы получите в процессе может быть лучше целого миллиона фаготов.
- Просто экспериментируйте, нигде это не поощряется так сильно, как в гибкой системе выдающей вам едва предсказуемые результаты. Вы можете никогда не получить то, что хотели, но можете нечаянно получить то, о чём даже не мечтали.

Другие типы синтеза

Несмотря на то, что мы рассмотрели две модели, по-моему, наиболее заслуживающие внимания, есть множество других, и упускать их из виду было бы несправедливо, поэтому перечислим и вкратце опишем их. Множество синтезаторов здесь пересекают границы и оказываются сразу в нескольких областях.

West-coast синтез или синтез западного побережья США — это обобщённое название для приёмов которые преобладали в синтезаторах Дональда Буклы, и в целом имеет смысл, только как противопоставление с East-coast, синтезом восточного побережья США. Ранее мы рассмотрели последний, как субтрактивный синтез. В West-coast формы волны могут вырабатываться из зацикленных генераторов огибающей и обогащаться тембрально через отражение волны по вертикали при пересечении порогового значения (wavefolding), логические операции с волнами или модуляцию на частотах слышимого диапазона. В качестве фильтра может выступать так называемый Lowpass Gate, гибрид усилителя с фильтром с очень пологим срезом частот и широким диапазоном частот действия. Сегодня такой тип синтеза можно встретить в таких синтезаторах, как Korg Volca Modular и Make Noise o-Coast.

Аддитивный синтез — это создание звука в результате сочетания многих его простых компонентов, например как это происходит в электрооргане. В противовес субтрактивному подходу, в аддитивном звук дополняется, усложняется, так что с натяжкой так можно назвать любой тип синтеза, в котором простая форма волны гармонически обогащается модуляциями или вэйвфолдингом.

Вокодер — это инструмент или эффект построенный на субтрактивном синтезе, который позволяет достичь характерного эффекта «роботизированного» голоса. Принцип действия — простой: в вокодер поступают два сигнала, носитель и модулятор (они только называются, как в FM синтезаторе, но вообще это не как в FM синтезаторе). Модулятор (чаще всего, человеческий голос) пропускается через набор из нескольких полосовых фильтров, например, восьми или шестнадцати, расположенных на равноудалённых частотах. Звук проходящий сквозь эти фильтры измеряется по громкости и тем самым получается приблизительный спектр. Носитель (чаще всего, синтезатор) пропускается через идентичный набор фильтров, громкость звука подаваемого в каждый фильтр регулируется тем самым спектром модулятора и в итоге мы получаем синтезатор с тембральными характеристиками голоса. Количество полосовых фильтров в вокодере влияет на отчётливость речи, например,

лучше распознаются высокие шипящие звуки. Как и везде, экспериментальный подход позволяет добиться более широкого применения, чем «голос робота», например если модулятором будет драм-машина, то синтезатор будет подражать ритму и тембру ударных, а если носителем будет гитара, то она будет петь вашим голосом, чему, возможно, порадуются ещё живые участники ВИА 70-х «Поющие Гитары».

Таблично-волновой синтез (wavetable) — это принцип, разработанный компанией PPG, он заключается в использовании форм волны, записанных в памяти синтезатора в цифровом виде. Один из подвидов такого типа синтеза, векторный синтез позволяет плавно перетекать из одной формы волны в другую и воспроизводить сложные последовательности таких волн. Сегодня применяется в Korg Wavestate.

PCM (pulse-code modulation) синтез — это воспроизведение звуков, записанных в память, как последовательность замеров аналогового сигнала с определённой частотой. Такой звук называется семплом (sample) и даже если звучит немного странно и сложно, это — самая знакомая вещь в современном мире. Вся цифровая музыка начиная с компакт-дисков и заканчивая стримингом — это длинные семплы. Тем не менее, первые коммерчески успешные семплеры появились ещё в 80-х. Ими можно пользоваться, как ритмической составляющей,

например воспроизводя семплы ударных инструментов, или как мелодической, если изменять скорость воспроизведения этих семплов и соответственно менять высоту звучащей ноты.

Гранулярный синтез — это техника создания звуков из очень коротких зацикленных фрагментов звука, записанного вживую или считанного с памяти, и тем самым он напрямую связан с РСМ. Отличие гранулярной модели от просто коротких семплов в том, что выборка этого фрагмента (или гранулы в местной терминологии) может быть очень гибкой, например можно определить ширину области, из которой с каждым циклом выбирается случайный фрагмент, и тем самым вместо монотонного гула зависшего компьютера создать сложный, завораживающий звук с почти реалистичными характеристиками. Встретить такую экзотику можно на не менее экзотичной коробочке Bastl Microgranny. На андроиде лично я ценю приложение [Grainstorm](#).

Гибридный синтез — это очень гибкий термин включающий в себя разные комбинации моделей синтеза в одном устройстве, будь то семплер с фильтром и огибающей или полноценный аналоговый синтезатор с дополнительным таблично-волновым осциллятором. Позволю себе личные привязанности и назову самым ярким примером Arturia Microbrute.

Bytebeat — это сверхкороткая музыкальная программа, способная создавать самоподобные и несоразмерно сложные музыкальные произведения из одной строчки кода с математическими инструкциями. Например, если мы пишем t , то программа будет звучать как пилообразная волна, потому что звук привязан к значению таймера процессора, но обнуляется после 256 тиков, но если мы начинаем складывать, перемножать, возводить в степень, получать модули этих таймеров, то получается что-то объективно сложное и субъективно красивое. Выше, в разделе с историей развития синтезаторной техники, упоминается влияние компьютерной демосцены на развитие музыкальных программ, и это тоже можно считать одним из его проявлений, ведь целый альбом такой музыки может уместиться всего в одном килобайте информации. На андроиде испытать это можно с помощью [Droidbeat](#) или в [Caustic](#) в виде синтезатора 8-bit, но и без него есть несколько онлайн утилит.

Физическое моделирование — это общий термин для моделей синтеза, эксплуатирующих упрощённые принципы построения звука в реальных объектах. В любой из этих моделей есть два ключевых компонента: медиатор и резонатор. Медиатор (exciter) — это, как правило, короткий шумовой импульс, либо шум нарастающий и угасающий по огибающей, который обрабатывается резонатором. Аналогами медиатора в

реальных инструментах может быть барабанная палочка, смычок, поток воздуха. Он определяет изначальные тембральные характеристики звука. Резонатор (resonator) имитирует корпус инструмента и соответственно, обогащает его одними гармониками, вычитает другие, определяет продолжительность звука (сустейн) и изменение тембральной окраски во времени. В Карплюс-Стронг синтезе, в качестве резонатора служит система из задержки (delay), фильтра и обратной связи. Время задержки определяет высоту ноты, фильтр определяет как меняется тембр с течением времени, сила обратной связи определяет продолжительность угасания ноты. Звучание напоминает реалистичный звук струны. В модальном синтезе в качестве резонатора выступает массив резонансных полосовых фильтров имитирующих гармоники, образующиеся в твёрдых полых телах. Расположение гармоник и то, как быстро и в каком порядке они угасают, определяет размер тела, материал, толщину стенок. В качестве медиатора в модальном синтезе можно использовать звуки полученные с помощью карплюс-стронг синтеза, но чем сильнее усложняется эта модель, тем сложнее (или дороже) её получить аналоговым путём. Наличие полифонии и вовсе переводит любую идею воссоздать такую машину в аналоговом исполнении в разряд научной фантастики.

Заключение

Именно на физическом моделировании мне хотелось бы закончить, потому что таким образом получается очень красиво замкнуть эту историю на самом начале. Мы прошли полный круг от инструментов, которые формой определяли свое звучание, до упрощённых моделей этих инструментов, которые контролируете вы и определяете их звучание сами. Несмотря на тягу в сторону реализма в течении всей истории синтеза, он позволяет нам получать завораживающие звуки, которых никогда не было. Именно понимание правил того, как они работают в реальности, позволяет нам нарушать эти правила. А это, как известно, самое весёлое.

Приложение

Здесь приложены адреса, которые кликабельны в пдфке, для
вашего удобства



Spectroid



Oscilloscope



Visual Analyzer



Harmonic Waveform Generator



Virtual ANS



Phonopaper



Гуглодудл Боба Моуга



Гуглодудл Клары Рокмор



VCV Rack



Dexed



Grainstorm



DroidBeat